

文章编号:1001-5078(2021)08-1065-05

· 光纤传感及光通讯技术 ·

基于平方运算与多重希尔伯特变换的 F-P 干涉振动测量

华震,高丙坤,岳航宇,崔翔宇
(东北石油大学电气信息工程学院,黑龙江大庆163318)

摘要:为了快速、简便地重构出物体的微振动,提出了一种基于平方运算与多重希尔伯特变换的振动测量方法。对采集到的干涉信号进行平方运算,使其干涉条纹的数量加倍,再对加倍后的干涉条纹在反向点两侧分别进行一次和三次的希尔伯特变换,重组出一组与之前相差 $\pi/2$ 相位的干涉条纹,两组信号做商得到解包相位,从而重构出微振动。本文通过数值仿真和实验信号验证了所提方法的有效性。

关键词:F-P干涉;平方运算;多重希尔伯特变换;振动测量

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.08.015

Vibration measurement based on square arithmetic and multiple Hilbert transform for F-P interferometry

HUA Zhen, CAO Bing-kun, YUE Hang-yu, CUI Xiang-yu
(School of Electrical Engineering & Information, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: In order to reconstruct the micro-vibration of objects quickly and easily, a vibration measurement method based on square arithmetic and multiple Hilbert transform is proposed. The collected interference signal is squared to double the number of interference fringes, and then the doubled interference fringes are subjected to one and three Hilbert transforms on both sides of the reverse point. A group of interference fringes with a phase difference of from the previous group is reconstructed, and the two groups of signals are quotient to obtain the unwrapped phase, thereby reconstructing the micro-vibration. At last, the effectiveness of the proposed method is verified through numerical simulation and experimental signals.

Keywords: F-P interference; square arithmetic; multiple Hilbert transform; vibration measurement

1 引言

快速发展的光学技术的一个重要分支是光纤干涉传感器的应用。已经证明这些传感器比电传感器灵敏几个数量级^[1],用于无接触的实时自动监测。光纤中的法布里-珀罗(F-P)干涉是一种快速、灵敏的振动分析的工具,它也可以与光纤信号传输相结合,在恶劣的工程环境中获得稳定的性能^[2-3]。

干涉信号最初用条纹计数法来恢复振动信息^[4],但其分辨率仅为波长的一半,这极大地限制

了测量精度。在F-P干涉测量位移的应用中,2018年陈海滨提出了一种以掺铒光纤放大器为光源的F-P干涉位移测量方法^[5],但只能实现于11 mm长度范围内1 μm 的分辨率,并且实验结构复杂;魏仁选提出了一种F-P干涉的微位移测量方法,利用F-P干涉的光谱相邻波峰之间的波长差与腔长的关系来测量位移,但其需要宽带光源,并且额外需要光谱仪等器件^[6];2005年,张彩妮提出了一种基于F-P干涉的角位移测量原理^[7],利用角位移与干涉信号条

作者简介:华震(1996-),男,硕士研究生,主要从事F-P干涉测量方面的研究。E-mail:2456765842@qq.com
收稿日期:2020-10-22;**修订日期:**2020-11-19

纹数变化的函数关系,来测量角位移,但是需要把初始入射角调至 40° 到 50° 之间。2014 年,李春成,王鸣等人提出基于 F-P 腔干涉的强度解调微位移方法^[8],可实现在 $\lambda/4$ 范围内,测量误差小于 1 nm,但是需要额外的相位调制,增加实验难度。在其他测量位移方法中,张恩政在 2013 年提出了一种基于数字频率时钟信号的上升条纹锁定的外差干涉相位测量方法^[9],但是需要解决外差干涉仪的非线性误差;2016 年,崔俊宁等人提出了一种新的零差正交干涉仪,可以大大抑制非线性误差。然而,这种方法需要高度对称的光学结构来获得两束激光之间的平衡干涉^[10]。

本文提出了一种基于平方算法与多重希尔伯特变换(MHT)相结合的振动测量方法,该方法易于实现目标振动重构,无振动长度范围限值,实验装置简单。对 F-P 干涉现象进行了理论解释,然后,对所提出的振动重构方法进行了详细的分析,通过数值模拟和实验分析验证了该方法相比于基于多重希尔伯特变换的振动测量降低了误差。

2 理论分析

2.1 F-P 干涉原理

F-P 腔是最方便的干涉配置,因为它只是由两个典型的平行镜面之间的空间形成,如图 1 所示。

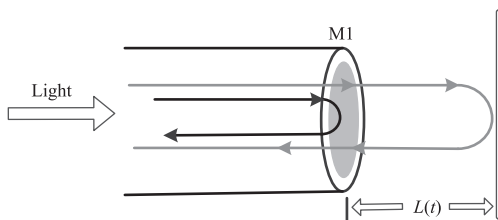


图 1 F-P 干涉原理图

Fig. 1 Schematic diagram of F-P interference

自由空间波长为 λ 的单色光波在两个平行镜面间形成 F-P 腔,光波在 F-P 腔内往返出现了相位滞后现象,相位滞后为^[11-12]

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \phi_1 - \phi_2 = 4\pi nL(t)\cos\theta/\lambda \\ &= 4\pi nL(t)/\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

其中, ϕ_1 和 ϕ_2 是相应两镜面的相位滞后; n 是镜面之间介质的折射率; $L(t)$ 是镜面间的距离; θ 是入射角。如果腔内为空气($n=1$)且入射光平行,这时 $\theta=0$ 。在双波干涉仪上叠加信号的平面波近似干涉的帮助下^[13-14],FP 干涉得到的输出功率 P 可以表示为:

$$P = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2)$$

A_1 和 A_2 是两个镜面反射信号的振幅。

$$\text{由公式(1),可推导出 } L(t) = \phi(t)\lambda/4\pi \quad (3)$$

2.2 平方算法原理

通过直流阻隔和归一化处理,由公式(1)和公式(2),干涉后的输出功率 P 可以写为:

$$P = \cos(4\pi L(t)/\lambda) \quad (4)$$

这时 P^2 可以写为:

$$\begin{aligned} P^2 &= \cos(4\pi L(t)/\lambda) \cdot \cos(4\pi L(t)/\lambda) \\ &= 1/2 \cos(2 \cdot 4\pi L(t)/\lambda) + 1/2 \end{aligned} \quad (5)$$

为了不使加倍后的输出功率引入新的常数,公式(5)整体减 1/2,得到 $1/2 \cos(2 \cdot 4\pi L(t)/\lambda)$,此公式为条纹加倍的公式,图 2 为平方算法流程图。

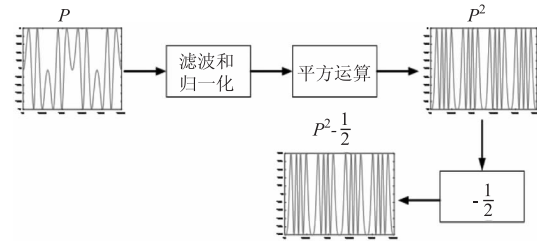


图 2 平方算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the square algorithm

对于周期余弦函数,如果目标的最小位移能引起一个条纹变化,设为 ΔL 。公式(5)中的相位变化量 $\Delta\phi$ 可以写为:

$$\Delta\phi = 2\pi = 2 \cdot 4\pi\Delta L/\lambda \quad (6)$$

因此,从公式(6)能得到 $\Delta L = \lambda/4$,条纹的精度在此时达到了 $\lambda/4$,故条纹加倍。

当经过平方运算后,由公式(5)可得,此时的 $\phi(t) = 2 \cdot 4\pi L(t)/\lambda$,故 $L(t) = \phi(t)\lambda/8\pi$ 。

为了验证该算法的有效性,进行了如下仿真。图 3 给出了目标运动的仿真结果。在图 3 中,激光波长为 1550 nm,运动是驱动频率为 100 Hz,零初始相位,振幅为 1.55 μm ,采样频率为 400 kHz,采样点 4000 个。

图 3(a)表示的是原始干涉条纹的图像,由于振幅为 1.55 μm ,故峰峰值为 3.1 μm ,由半波长代表一个条纹,故初始条纹 4 条。图 3(b)展示了经过平方算法后的图像,初始参数与图 3(a)参数保持一致,由图像可看出条纹增加到 8 条。故验证了其原理的有效性。

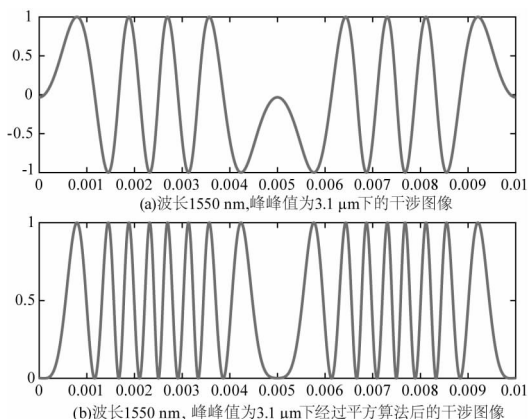


图3 平方运算仿真图

Fig.3 Simulation of square arithmetic

2.3 多重希尔伯特变换原理

希尔伯特变换的表达式为:

$$H[\cos(\Phi)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(\Phi)}{t - \tau} d\tau \quad (7)$$

希尔伯特变换对原始干涉信号实现 $\pi/2$ 的相移,当进行 3 次希尔伯特变换实现 $3\pi/2$ 的相移,则在数学上等价于实现 $-\pi/2$ 相移,故可以总结为希尔伯特变换类似于 $\pi/2$ 的移相器,即输入一个正弦信号可得出余弦信号,因此可以通过希尔伯特变换得到 $\tan[\phi(t)]$,然后通过相位展开得到 $\phi(t)$ [15]。

图 4(a)展示了 F-P 干涉信号经多重希尔伯特变换的信号与初始信号,①的信号是初始的干涉信号,②的是干涉信号经多重希尔伯特变换后的信号。图 4(b)展示了包裹相位 $\arctan(\phi(t))$ 。

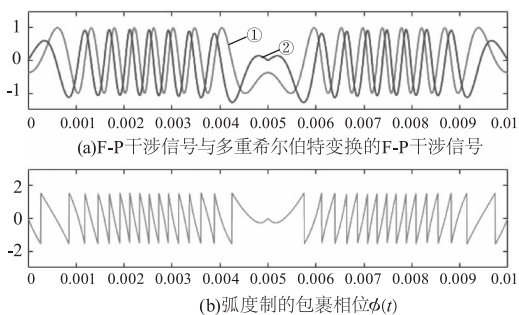


图4 仿真多重希尔伯特变换信号

Fig.4 Simulates signals of multiple Hilbert transforms

2.4 数值仿真

为了验证算法的有效性和准确性进行如下的仿真。图 5 和图 6 分别展示了基于多重希尔伯特变换的振动重构和基于平方运算和多重希尔伯特变换的振动重构,在图 5 和图 6 中,设置激光波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$,物体运动的驱动频率为 80 Hz,零初始相

位,并且振幅为 $A = 3.1 \mu\text{m}$ ($A = 2\lambda$),采样频率为 50000 Hz,采样点为 5000,图 5(a)表示的初始 F-P 干涉信号,图 5(b)为 F-P 干涉信号经多重希尔伯特变换后的信号,图 5(c)①为原始物体振动位移,②是经该算法重构出的振动位移,图 5(d)显示的为重构出的位移与初始位移间的误差。图 6(a)表示初始 F-P 干涉信号,图 6(b)表示经平方运算后的干涉信号,图 6(c)表示初始信号先经平方运算再通过多重希尔伯特变换后的信号,图 6(d)和(e)表示的与图 5(c)和(d)表示的一致。对比图 5 和图 6 可知,基于平方运算与多重希尔伯特变换的振动重构的精确度明显高于基于多重希尔伯特变换的振动重构的精度。

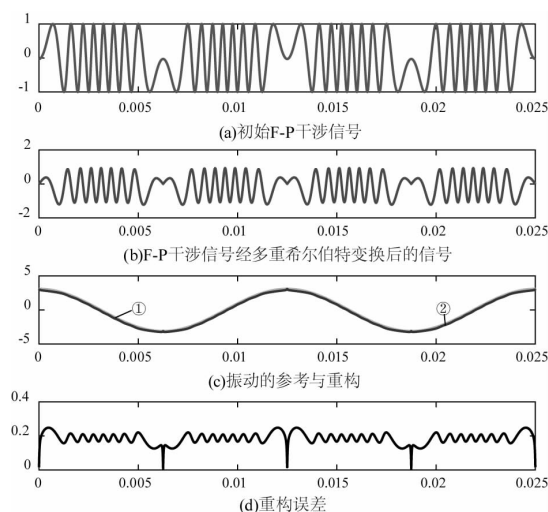


图5 基于多重希尔伯特变换的振动重构仿真图

Fig.5 Vibration reconstruction simulation based on multiple Hilbert transforms

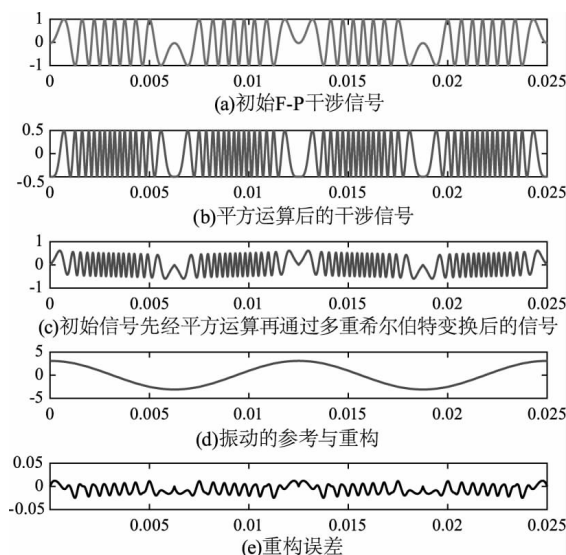


图6 基于平方运算与多重希尔伯特变换的振动重构仿真图

Fig.6 Vibration reconstruction simulation diagram based on square operation and multiple Hilbert transform

3 测量实验与结果

为了进一步证明所提方法的有效性,进行如下实验,图 7 为实验装置。DFB 激光器的波长为 1550 nm,DFB 激光器与耦合器相连,耦合器其中一个端口的光照射在一面镜子上,其镜子放在压电陶瓷器(PZT)上做振动,另一个端口用于照射在外置 PD,用于采集干涉信号,通过数据采集模块(USB-4431,NI)获取电压信号,并在 PC 上进行处理。

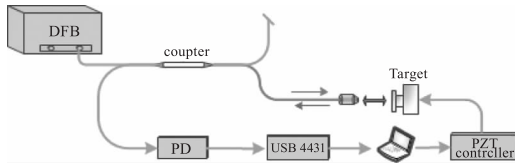


图 7 实验装置图

Fig. 7 Experimental setup diagram

首先,PZT 控制的运动频率 5 Hz,振动峰峰值为 6.2 μm ,采样频率为 50 kHz,图 8(a)展示了实验干涉信号,图 8(b)展示了其干涉信号的多重希尔伯特变换后的信号,图 8(c)①表示参考振动信号,②为重构的信号,图 8(d)显示了重构误差。

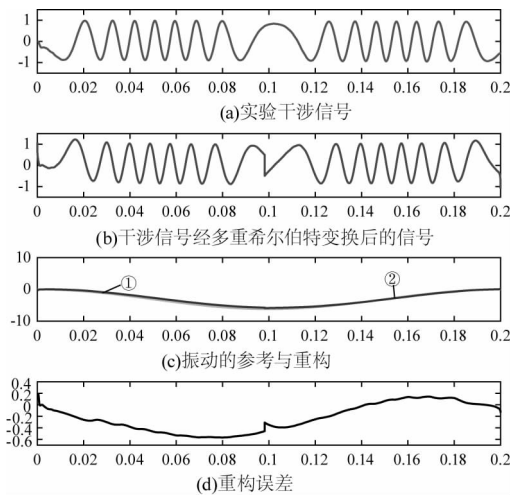


图 8 基于多重希尔伯特变换的振动重构实验图

Fig. 8 Vibration reconstruction experimental diagram based on multiple Hilbert transforms

接下来进行基于平方运算与多重希尔伯特变换的振动测量,与图 8 实验的数据相同,图 9(a)显示了实验的干涉信号,图 9(b)展示了其经过平方算法后的信号,图 9(c)显示了平方运算后的多重希尔伯特变换信号,图 9(d)显示了①的参考振动信号以及②的振动重构信号,图 9(e)显示了重构误差。由图 9(d)所示,重构振动信号的最大误差为 5.65%,由图 9(e)所示,重构的最大误差为 4.1%。表 1 列出

其他组实验数据的误差比较。

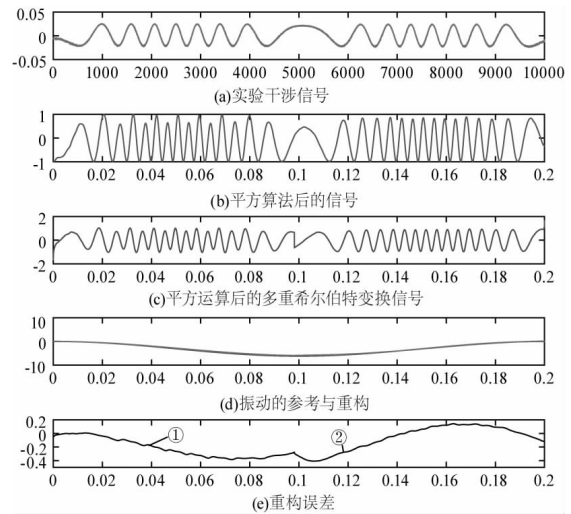


图 9 基于平方运算与多重希尔伯特变换的振动重构实验图

Fig. 9 Vibration reconstruction experimental diagram based on square arithmetic and multiple Hilbert transforms

表 1 两种算法重构振动的误差比较

Tab. 1 Comparison of the errors of the two algorithms in vibration reconstruction

两种算法重构的误差比较/%	
基于多重希尔伯特变换的振动重构	基于平方运算与多重希尔伯特变换的振动重构
5.13	3.78
4.78	3.36
5.42	4.06
4.42	3.06

4 结论

本文提出了一种快速有效的微振动重构方法。先通过平方算法使 F-P 干涉条纹加倍,然后对反向点两侧的干涉条纹分别进行一次和三次希尔伯特变换,重组出一组与加倍后信号相差 $\pi/2$ 相位的信号,然后重构出物体的振动。并且实验装置结构简单,不涉及任何复杂的计算。实验结果表明:振动测量精度在纳米级,相比于基于多重希尔伯特变换的振动测量可降低误差。

参考文献:

[1] Grattan K T V, Meggitt B T. Optical fiber sensor technology[J]. Optica Acta International Journal of Optics, 2000, 42(4):938.
 [2] Gangopadhyay T K, Henderson P J. Vibration: history and measurement with an extrinsic Fabry-Perot sensor with

- solid-state laser interferometry[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12):2471-2477.
- [3] Gangopadhyay, Kumar T. Non-contact vibration measurement based on an extrinsic Fabry-Perot interferometer implemented using arrays of single-mode fibres[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(5):911-917.
- [4] Gangopadhyay T K, Chakravorti S, Chatterjee S, et al. Time-frequency analysis of multiple fringe and nonsinusoidal signals obtained from a fiber-optic vibration sensor using an extrinsic Fabry-Pérot interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(5):2122-2131.
- [5] Chen Haibin, Chen Qingqing, Wang Kening, et al. Optical fiber Fabry-Perot cavity displacement sensing with EDFA as the light source[J]. *Chinese Journal of Sensing and Actuators*, 2018, (8):1164-1168. (in Chinese)
陈海滨, 陈青青, 王可宁, 等. 以 EDFA 为光源的光纤 Fabry-Perot 腔位移传感[J]. *传感技术学报*, 2018, (8):1164-1168.
- [6] Wei Renxuan, Jiang Desheng. Experimental study on displacement measurement based on fiber F-P interferometer[J]. *Optical Instruments*, 2003, 25(5):7-9. (in Chinese)
魏仁选, 姜德生. 光纤 F-P 微位移测量实验研究[J]. *光学仪器*, 2003, 25(5):7-9.
- [7] Zhang Caini. Angular displacement Fabry-Perot interferometry[J]. *Photoelectric Engineering*, 2005, 32(6):69-71. (in Chinese)
张彩妮. 角位移 Fabry-Perot 干涉测量[J]. *光电工程*, 2005, 32(6):69-71.
- [8] Li Chuncheng, Wang Ming, Xia Wei, et al. A novel Fabry-perot micro-displacement sensor based on intensity demodulation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014(6):272-277. (in Chinese)
李春成, 王鸣, 夏巍, 等. 基于 F-P 腔强度解调的微位移传感器[J]. *光学学报*, 2014(6):272-277.
- [9] Zhang E, Chen B, Yan L, et al. Laser heterodyne interferometric signal processing method based on rising edge locking with high frequency clock signal [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4):4638-4652.
- [10] Cui J, He Z, Jiu Y, et al. Sun, Homodyne laser interferometer involving minimal quadrature phase error to obtain subnanometer nonlinearity [J]. *Appl. Opt.* 55(2016)7086-7092.
- [11] Saleh, Bahaa E. A, Teich, Malvin Carl. *Fundamentals of photonics*[J]. *Physics Today*, 1992, 45(11):87-88.
- [12] J M Vaughan. *The Fabry-Pérot Interferometer*. Bristol, U. K.: Adam Hilger, 1989.
- [13] Yoshino T, Kurosawa K, Itoh K, et al. Fiber-Optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, 18(10):0-1633.
- [14] Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M, et al. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(4):273-275.
- [15] Zhang Z, Li C, Huang Z. Vibration measurement based on multiple Hilbert transform for self-mixing interferometry[J]. *Optics Communications*, 2019, 436:192-196.